

# 運動エネルギー測定法の検討

藤 林 寿 一\*

運動エネルギーについて、実験を中心にした授業の展開をねらい、ものさしと段ボール箱を用いる測定法を取り上げ、実験結果のばらつきと仕事への変換率の2つから検討を加えた。その結果、ものさしを用いる場合は、摩擦力をほぼ同じ大きさにし、さらに、その大きさを正確に測定すれば、班によるばらつきを最小限に抑えることができることを確認した。また、段ボール箱の中に力学台車を衝突させる方法が、運動エネルギーの大きさをほぼそのまま測定する方法として、有効であることがわかった。

## I はじめに

理科の授業における「観察・実験」の重要性は、絶えず言われ続けてきたことであり、今回の指導要領の改訂では、今まで以上に強調されている。

今回取り上げた「運動エネルギー」についても、現行指導書では「速さや質量を変えたときの仕事の変化を力学台車などの実験を通して考察させ、運動エネルギーが物体の質量と速さに関係することを定性的に理解させること」となっている。

教科書などで取り上げられている運動エネルギーの測定方法としては、木片やくい打ち実験装置などに力学台車を衝突させて測る方法や、運動している力学台車におもりを引き上げさせて、位置エネルギーに変えて測る方法などがある。ところが、木片や金属管を使う方法では、ばらつきが大きかったり、位置エネルギーに変える方法も装置が大変な割には、あまり正確な値が出ないという問題点がある。そのようなこともあってか、各社の教科書を見ると生徒実験として取り上げているものは、ものさしを使っている1社だけで、他は実験についての説明だけで終わっている。

しかし、エネルギーという抽象的な内容を生徒にとらえさせるには、できるだけ実験を中心とした授業を展開していきたい。その場合、いくら「定性的に」とはいえ、ある程度の正確さのある実験でないと生徒の納得は得られない。

以上のことから、できるだけ正確で、しかも簡単な測定法として、ものさしを使う測定法と段ボール箱を利用した測定法について、実験結果のばらつきと仕事への変換率（運動エネルギーがどのくらい仕事に変わるか）を中心に検討してみた。

## II ものさしを使った測定法について

ここでは1本のものさしを使い、実験結果のばらつきについて検討する。

### 1. 実験方法

原則的には、図1のような教科書の方法で実験を行ったが、詳細については下記の通りである。

---

\* 理科長期研修員（柏崎市立教育文化センター・柏崎市立第二中学校）

速さは、予め記録テープに、台車が物体と衝突する箇所に印をつけ、その印を基に衝突直前の5打間隔より求めた。

摩擦力は、ばねはかりでものさしを静かに引いて動かすときの力と考え、実験の前後2回ずつ測定し、平均を出して求めた。

台車の質量は、0.92 kg, 1.92 kg, 2.92 kgとした。

以降の実験も原則的には、この方法で行った。

## 2. 実験結果及び考察

実験結果を図2, 3に示す。

図2では、台車の速さともものさしの移動距離（仕事とみなす）の間のばらつきをはっきりさせるために、台車の速さの2乗を横軸にとった。

図3は台車の質量と仕事の関係を表しているが、台車の速さを一定にして実験することが難しいので、図2より台車の速さを1 m/秒としたときの、ものさがされた仕事を求めてグラフ化した。

### (1) 速さと仕事との関係について

図2では、ばらつきがほとんど見られない。このグラフのようであれば、生徒にとって台車の速さの2乗と仕事が比例することの理解が容易と思われる。

なお、ここでは移動距離を実際にものさしの目盛りから読むようにした。教科書の通りに記録テープから求めると、かなりのばらつきがでる。

### (2) 質量と仕事との関係について

図3は、ばらつきが小さい、ほぼ原点を通る直線になった。これならば、生徒にとって台車の質量と仕事の比例関係が良くわかるものと思われる。



図1 ものさしを使った測定法

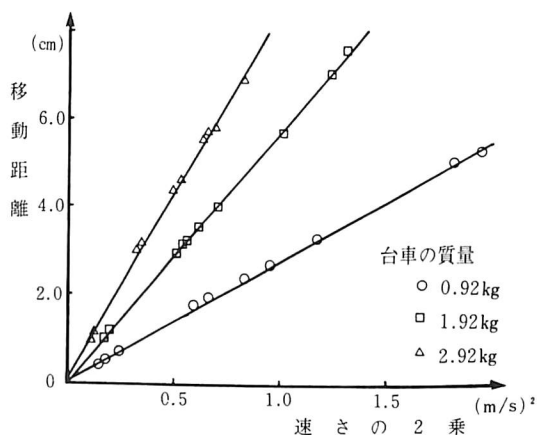


図2 台車の速さの2乗と移動距離

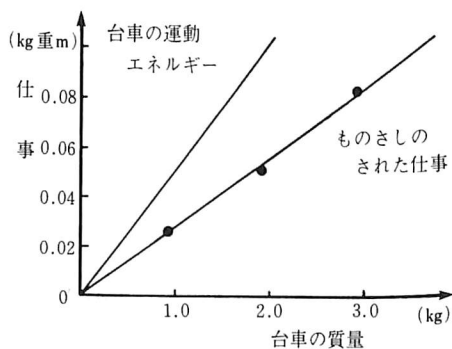


図3 台車の質量と仕事

## Ⅲ ものさしを使った測定法の変換率について

上記のようにものさしを使った測定法には、ばらつきが小さいことや準備が簡単で実験の個別化がしやすいことなど多くの利点がある。ところが、図3で台車の持っていた運動エネルギーとものさがされた仕事を比べてみると、その変換率は約60%であることがわかる。

次に、班による実験を前提に考えた場合、変換率が摩擦力や台車の質量によって変わると、各班の結

果をまとめて処理する段階で、ばらつきが出ると考えられるので、変換率について検討した。

### 1. 仕事への変換率の求め方

ここでは仕事への変換率を次のようにして求めた。

- ① 台車の速さを変えて10回測定し、速さの2乗とものさしの移動距離の関係を図2のようなグラフにする。
- ② グラフより速さの2乗が1 (m/秒)<sup>2</sup> つまり、速さ1 m/秒のときの移動距離を求める。
- ③ 摩擦力の測定値と②で求めた移動距離から、ものさしのされた仕事の大きさを決める。
- ④ 台車の質量と1 m/秒の速さから、台車の運動エネルギーを計算で求める。
- ⑤ ③と④から変換率を計算する。

### 2. 摩擦力の大きさによる違い

図2で、台車の速さの2乗と仕事の大きさの関係は、ほとんどばらつきのない直線で結べる。このことから、1本のものさしについては、台車の衝突によって動かされる時、速さに関係なく摩擦力は一定と考えられる。授業では、ものさしやそれをはさむ本の種類などの条件は統一して行う。しかし、そのような状態で測定してもそれぞれの摩擦力は完全に同じではない。

そこで、1本のものさしを使い摩擦力だけを変えて変換率を調べた結果が図4である。この結果より変換率は摩擦力が大きくなるにつれて良くなっていく傾向があるといえる。

変換率が変わる主な原因としては、台車の衝突によってものさしをはさんでいる本が変形するが、その変形の度合が変わることが考えられる。

摩擦力を大きくするために上におもりを乗せていくと、変形しにくくなり、その結果本などの変形に使われていたエネルギーが減少し、変換率が良くなると考えられる。

以上のように、変換率も摩擦力（上から押す力）によりわずかではあるが変わると考えられるので、できるだけ同じ摩擦力で実験をするほうがよい。

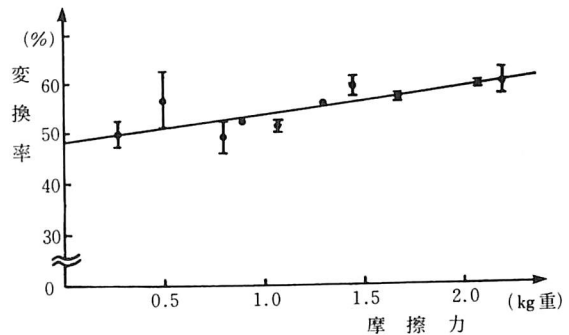


図4 摩擦力と変換率

### 3. ものさしによる違い

表1は、竹の30cmものさし4本について、同じ条件で実験を行い、そのときの摩擦力および変換率を調べた結果である。同じ竹の30cmのものさしでも、ものさしによって55.6～62.4%と約±3%の変換率の幅がある。しかし、±3%の幅ならば、実際の実験ではほとんど影響は出ないものと思われる。

### 4. 台車の質量による違い

台車の質量を変えたときの変換率を調べた結果が図5である。このときの摩擦力は、0.98～1.08 kg 重

表1 竹のものさしによる違い

| ものさし | 摩擦力<br>(kg 重) | 変換率<br>(%) | 相関係数   |
|------|---------------|------------|--------|
| a    | 1.30          | 56.4       | 0.9995 |
| b    | 1.40～1.50     | 55.6～59.6  | 0.9987 |
| c    | 1.30～1.40     | 56.0～60.3  | 0.9952 |
| d    | 1.25～1.30     | 60.0～62.4  | 0.9996 |

\* 台車の質量は、すべて1.92 kg である。

とほぼ一定であった。

図5より、竹のものさしの変換率は、台車の質量に関係しないと思われる。

参考のために鋼尺B(後述)についても調べたが、鋼尺Bは台車の質量が大きくなるにつれて、変換率が低くなる傾向がみられた。(摩擦力は0.68~0.88kg重であった。)

## 5. 実験上の留意点

竹の30cmものさしを用いた測定では、摩擦力が一定であれば、各班の結果をまとめてもばらつきは出ないと考えられる。しかし、実際には摩擦力を一定にしようとしてもある程度のばらつきはでる。また、その値を測定するばねはかりの精度自体あまり高くない。さらに、摩擦力を測定するときは、ものさしを引きながら測定するため、どうしても目盛りの揺れが生じ、読み取り誤差はより大きくなる。

以上のことから留意点として、次のことがあげられる。

- ① 実験前に各班のばねはかりを調整し、ばねはかりによる誤差を小さくすること。
- ② 摩擦力の測定回数を増やすなど、読み取り誤差を小さくすること。
- ③ ものさしの表面の汚れをよく落とし、滑らかにものさしが動くようにすること。
- ④ はさむ場所によっても摩擦力が変わるので、印をつけ毎回同じ場所にはさむようにすること。

## IV 他のもものさしについての検討

### 1. 他のもものさしについて

教科書では、竹の30cmものさしと明記してあるが、それに代わるものはないかと思い、表2のように他のもものさしについて、変換率や速さによる移動距離のばらつきを調べてみたが、その結果次のことがいえる。

- 竹の50cmものさしは節がある関係か、ばねはかりで摩擦力を測定するときの目盛りの揺れが大きい。また、最小目盛りが端の10cm以外は2mmになっており、移動距離を読み取りにくい。
- プラスチックのものさしも、摩擦力を測るときの目盛りの揺れが大きい。
- ステンレス製の鋼尺A(技術家庭科で使うもの)、同じくステンレス製の鋼尺B(ホームセンターで購入したもので、鋼尺

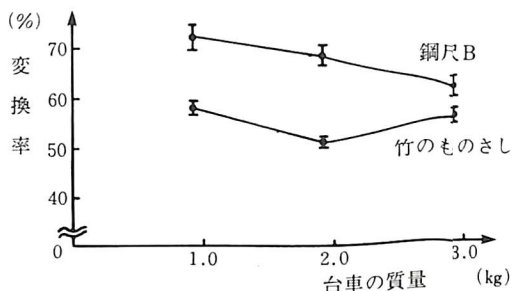


図5 台車の質量と変換率

表2 各種のものさしについて

| 種 類           | 摩擦力(kg 重)   | 変換率 (%)   | 相関係数   |
|---------------|-------------|-----------|--------|
| 竹 50 cm       | 1.05~1.20   | 62.9~71.9 | 0.9978 |
| プラスチック 36 cm  | 1.30~1.70*1 | 51.8~67.7 | 0.9972 |
| ステンレスA 30 cm  | 1.05        | 55.9      | 0.9958 |
| ステンレスB 30 cm  | 0.85~0.90   | 66.9~70.8 | 0.9994 |
| ア ル ミ 30 cm   | 1.10~1.15   | 59.5~62.2 | 0.9975 |
| ア ル ミ 45 cm*2 | 0.90~0.92   | 54.7~55.9 | 0.9994 |

\* 1 測定値の幅が大きすぎ、信頼性に欠ける。

\* 2 これだけは、電話帳にはさんでの実験結果である。

Aとは成分が少し異なる。)については、摩擦力の測定値も安定しており、また、両方とも最小目盛りが、0.5mmで移動距離の測定誤差を小さく抑えることに有効である。

- アルミのものさしは、表面に凹凸があるにもかかわらず、両方とも摩擦力の測定値が安定している。
- どのものさしも、速さの2乗と移動距離の関係をグラフにすると、ばらつきのほとんどないきれいな直線になり、竹のものさし同様実験中の摩擦力は、ほぼ一定と考えられる。
- 仕事への変換率については、鋼尺Bが67～70%、竹の50cmものさしが63～72%とやや高くなっているが、摩擦力の違いなどを考慮すると、ものさしの種類による違いは小さく、変換率はほとんど60～70%前後という結論が妥当と思われる。

以上より、竹の30cmものさしにこだわる必要はなく、鋼尺やアルミのものさしでもほぼ同じ結果が出ると思われる。特に、アルミの45cmものさしでは、電話帳にはさんでも約15cmは測定に使え、端に穴も開いており摩擦力を測る場合にも便利である。

## 2. ものさしを使った測定法のまとめ

- 竹の30cmものさしを使った測定では、ばらつきはほとんど見られない。
- 運動エネルギーの仕事への変換率は、今回使用した竹の30cmものさしで60%前後、他の種類のものさしでは60～70%であり、摩擦力の大きさなどによって変わることがある。
- 変換率の変化によるばらつきは、摩擦力の大きさがある範囲にそろえ、さらにその値を正確に測定することによって抑えられる。
- 竹の30cmものさし以外にも、アルミの45cmものさしやステンレス製の鋼尺の利用も考えられる。

## V 段ボールを利用した測定法での変換率

ものさしを用いる方法ではばらつきは小さいが、仕事への変換率については60～70%前後という結果であった。そこで、台車の持っていた運動エネルギーがもっと高い割合で、仕事に変わる測定法はないかと思い、段ボール箱を利用した場合の変換率について検討した。

### 1. 衝突前と衝突後の運動エネルギーの比

今回の実験のように、静止している物体に運動している物体が衝突するときの衝突後の運動エネルギーは、運動量保存の法則より次のように求められる。

静止している物体（箱）にもう1つの物体（台車）が衝突し、衝突後は2つが一緒になって動くと考ええる。台車の質量を $M$ 、箱の質量を $m$ 、台車の衝突前の速さを $V$ 、衝突後2つの物体が一緒になったとしてその動く速さを $v$ とすると、台車が、衝突直前に持っていた運動エネルギーは次のようになる。

$$E_K = (1/2) M V^2$$

衝突後2つの物体が持つ運動エネルギーの大きさは、次のようにして求められる。

$$\text{運動量保存の法則より} \quad M V + 0 = (M + m) v$$

$$\text{これより衝突後の速さは,} \quad v = [M / (M + m)] V \cdots \cdots (1)$$

衝突後の運動エネルギーの大きさは、

$$E_K' = (1/2) (M + m) v^2$$

$$(1)より \quad E_K' = (1/2)(M+m)[MV/(M+m)]^2 = (1/2)[M^2/(M+m)]V^2$$

以上より衝突前と衝突後の運動エネルギーの比は、

$$E_K'/E_K = [M/(M+m)] \times 100 (\%) \dots\dots\dots(2)$$

つまり、衝突による運動エネルギーのロスを小さくするには、衝突する物体（台車）の質量を大きくし、反対に、衝突される物体（箱）の質量は小さくすれば良いということがわかる。

木片の場合の測定結果では、変換率について上の(2)式から求めた値（計算値）に近いものが出ていたが、それらにはかなりのばらつきがあった。そこで、質量が小さく、しかも、床との接地面積が広く摩擦力が一定になるものとして段ボール箱の利用を考えた。

## 2. 実験方法

ものさしを使った方法と基本的には同じであるが、図 6 のように段ボール箱の外側に力学台車を衝突させる方法（実験 A）と段ボール箱に吸盤を取り付けて行う方法（実験 B）さらに、台車が衝突する面を取り除いて箱の内側に台車を衝突させる方法（実験 C）を行った。

摩擦力は、それぞれ台車と箱が衝突した後の状態にして、ばねはかりで引いて測定した。また、摩擦力を変えるときは箱におもりを載せた。

移動距離を読み取りやすくすることと、箱の直進性を良くするために 4.5 cm 角のタルキを添木として使い、その上に移動距離を測定するためのスケールを固定した。

## 3. 段ボール箱について

箱であれば段ボール箱にこだわる必要はないが、どこにでもあり、また、丈夫で、加工も簡単なので使用した。

実験 C の場合は台車が完全に中に入る大きさであれば、できるだけ質量は小さい方がよい。また、段ボールの厚さによって、机の面と台車の乗る面との間に段差ができるが、この段差があると記録テープ上の打点のばらつきが大きくなるので、厚紙を利用して段差のできるところに斜面を作り、台車の運動が滑らかになるようにした。

## 4. 台車の質量と変換率

### (1) 実験 A, B の変換率

実験 A, B とも、最初は質量 0.3 kg の箱の上におもりを載せて実験をし、変換率を求めた（表 3）。なお、表中の計算値は(2)式より求めたものである。

表中の計算値より、実験 A, B とも台車の質量が増えていくに

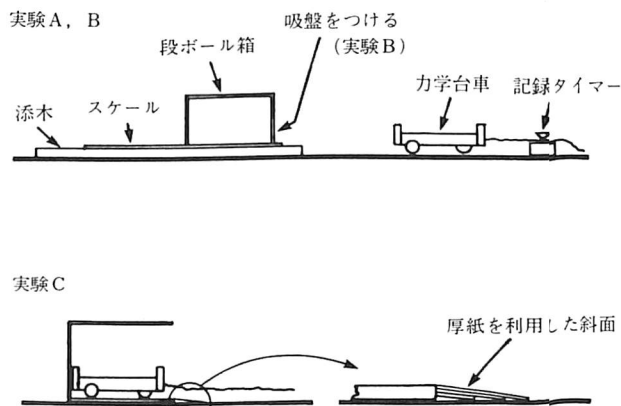


図 6 ダンボール箱を利用した測定法

表 3 実験 A, B の変換率（改良前）

・実験 A（箱の質量 0.526 kg）

| 変換率<br>(%) | 台車の質量 (kg) |      |      |
|------------|------------|------|------|
|            | 0.92       | 1.92 | 2.92 |
| 測定値        | 68.9       | 87.1 | 79.9 |
| 計算値        | 63.6       | 78.5 | 84.2 |

・実験 B（箱の質量 0.537 kg）

| 変換率<br>(%) | 台車の質量 (kg) |      |       |
|------------|------------|------|-------|
|            | 0.92       | 1.92 | 2.92  |
| 測定値        | 49.8       | 92.9 | 108.8 |
| 計算値        | 63.1       | 78.1 | 84.5  |



したがって、変換率は上がっていくはずであるが、実験Aでは70～80%の間で不規則に変化している。また、実験Bの場合は変換率が上がっていくのはよいが、その上がり方が異常であり最高で約20%も計算値より高くなっていた。

この原因としては、台車に押されて箱が移動しているときの摩擦力が、測定値と違っていること以外考えられなかった。つまり台車が箱の下側に衝突するため、結果的には箱が一部持ち上がったまま移動するという現象が起きていると考えた。

そこで、箱が持ち上がらないように、おもりを箱の下の方の両端に置き、再度実験した。

その結果、(表4) 両方とも計算値にかなり近い値になった。特に実験Bでは、計算値との差が±2%以内という結果になり、吸盤使用の効果が確認された。

上のように条件設定がしっかりしないと、思わぬ結果になることがあるので、注意を要する。

## (2) 実験Cの変換率

実験Cについても、台車の質量を変えたときの変換率を表5に示す。箱の質量が0.3kgと小さいため全体に変換率が高くなっている。また、実験Cも実験Bほどではないが、かなり計算値に近い値である。

## 5. 箱の質量と変換率

次に台車の質量を一定にして、箱の質量と変換率の関係を実験Cについて調べた。実験Cを選んだ理由は、今までの実験からA、Bの方法に比べて箱の質量を小さくした場合においても、衝突後の箱の動きが安定しているからである。

ところで、変換率を考えると、摩擦力の値が大きなポイントになるので、摩擦力の測定値について検討した。箱の質量（おもりを含む）とそのときの摩擦力の関係をグラフにすると、原点を通る直線になり、ばらつきも小さかった。つまり、摩擦力は箱の質量（面を垂直に押す力）に比例するという関係が成立しており、このことから摩擦力の値にある程度の信頼性をおいてよいと考えた。

図7に、以上を踏まえて測定した箱の質量と変換率の関係を示す。なお、計算値は、(2)式から求めたものである。図7から、実験Cの変換率は、いくぶんロスはあるものの、ほぼ計算値通りの変化をしているといえる。

実験A、Bの変換率も、表4の結果から考えて

表4 実験A、Bの変換率  
(改良後) (箱の質量 1.01 kg)

| 変換率 (%) |     | 台車の質量 (kg) |      |      |
|---------|-----|------------|------|------|
|         |     | 0.92       | 1.92 | 2.92 |
| 測定値     | 実験A | 49.3       | 61.7 | 60.8 |
|         | 実験B | 49.8       | 64.5 | 75.7 |
| 計算値     |     | 47.7       | 65.5 | 74.3 |

表5 実験Cの変換率  
(箱の質量 0.30 kg)

| 変換率 (%) |  | 台車の質量 (kg) |      |      |
|---------|--|------------|------|------|
|         |  | 0.92       | 1.92 | 2.92 |
| 測定値     |  | 70.0       | 92.3 | 99.4 |
| 計算値     |  | 75.4       | 86.5 | 90.7 |

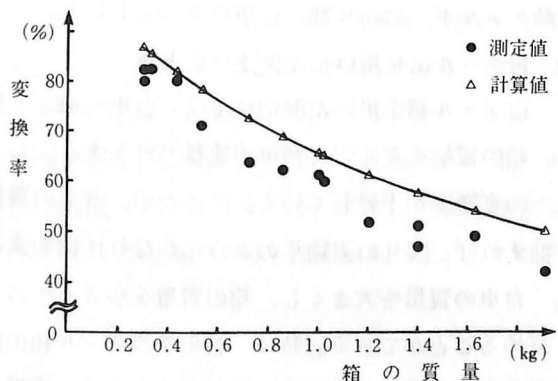


図7 箱の質量と変換率

実験Cとはほぼ同じ変化をするといえる。

## VI 段ボール箱を用いた運動エネルギーの測定

### 1. 台車の速さと箱の移動距離の関係

結果は、図8に示す。実験A、Cとも速さの2乗と移動距離は、比例関係になり、ものさしの場合と同様にばらつきは小さい。

しかし、吸盤を利用した実験Bの結果は、Aよりもばらつきが大きくなった。理由として、吸盤と台車の吸着が一樣でなく、そのために吸盤の変形の仕方と力のかかり方に違いが生じることが考えられる。

### 2. 台車の質量と仕事の関係

(2)式より、箱の質量が小さいほど変換率が高いといえる。そのことから考えると、台車の質量を大きくしていったとき、箱の質量が小さいほど、変換率の上昇の幅を小さく抑えられる。

しかし、実験A、Bで箱の質量を小さくして、台車の質量だけを増やすと、移動距離が大きくなりすぎて、実験台の上での測定が難しくなる。それで、箱の質量を実験A、Bでは1.01kg 実験Cでは0.16kgとした。

結果は図9のように、実験Bはやや原点から離れた直線になったが、実験A、Cでは、ほぼ原点を通る直線になった。さらに、実験Cでは、台車の持っている運動エネルギーの約9割が仕事に変わっている。

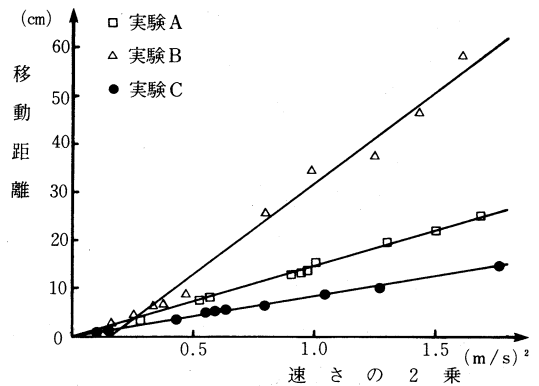


図8 台車の速さの2乗と移動距離

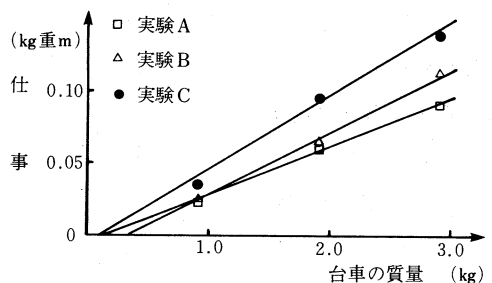


図9 台車の質量と仕事

### 3. 段ボール箱を用いた測定法のまとめ

- 段ボール箱を用いた測定法では、台車の速さと箱の移動距離の間のばらつきは、ほとんどない。
- 箱の質量を変えずに台車の質量だけを大きくしていくと、台車の持っている運動エネルギーの仕事への変換率が上昇していく。そのため、台車の質量と仕事は比例しない。しかし、箱の質量を小さく抑えれば、図9の実験Cのようにかなり比例関係に近づけることができる。
- 台車の質量を大きくし、箱の質量を小さくすることによって、運動エネルギーの仕事への変換率を高めることができる。特に、台車を段ボール箱の内側で衝突させる方法(実験C)は、台車自体の質量を利用して摩擦力を生み出しているため、変換率が非常に良く、運動エネルギーの大きさをほぼそのまま測定できる。
- 上記実験Cの方法は、高校での「運動量保存の法則」を確かめる実験への利用も考えられる。